

УДК 681.883.2 (045)

**А.А. Черняев**  
Национальный авиационный университет,  
E-mail: [aac@nau.edu.ua](mailto:aac@nau.edu.ua)

## РАЗРАБОТКА СПЕКТРАЛЬНОГО АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

### *Abstract*

**Chernyaev A.A. Development of spectral acoustic method of control for the exposure of defects in a concrete construction.** The problem of stability of buildings becomes more meaningful during their exploitation. The analysis of ultrasonic methods, suitable for fault detection of composition materials is resulted in the article. On the basis of the got analysis it is possible to choose the most acceptable method for fault detection of heterogeneity and emptinesses in concrete constructions.

**Keywords:** stability, building, methods of heterogeneity, ultrasound, control.

### *Анотація*

**Черняєв О.О. Розробка спектрального акустичного методу контролю для виявлення дефектів у бетонних конструкціях.** Проблема стійкості будинків стає все більш значимою при їхній експлуатації. У статті наведений аналіз ультразвукових методів, придатних для дефектоскопії композиційних матеріалів. На підставі отриманого аналізу можливо вибрати найбільш прийнятний метод для дефектоскопії неоднорідностей і порожнеч у бетонних конструкціях.

**Ключові слова:** стійкість, будівля, методи неоднорідностей, ультразвук, контроль.

### *Аннотация*

**Черняев А.А. Разработка спектрального акустического метода контроля для выявления дефектов в бетонных конструкциях.** Проблема устойчивости зданий становится все более значимой при их эксплуатации. В статье приведен анализ ультразвуковых методов, пригодных для дефектоскопии композиционных материалов. На основании полученного анализа возможно выбрать наиболее приемлемый метод для дефектоскопии неоднородностей и пустот в бетонных конструкциях.

**Ключевые слова:** устойчивость, здание, методы неоднородностей, ультразвук, контроль.

### **Введение.**

Увеличивается как количество многоэтажных зданий, так и сокращается площадь качественной поверхности земной коры, не подверженной деформации, на которых строятся дома. Эти факторы приводят к нарушению устойчивого состояния зданий и их разрушению.

### **Актуальность.**

Во многих городах Украины и других странах существуют сооружения, которые находятся в опасной зоне из-за подземных шахтных выработок, плавучих грунтов, размывания фундамента техногенными и почвенными водами, колебаний земной поверхности. Необходим контроль устойчивости подобных строений. Другой причиной потери жесткости может служить транспорт, который приводит к негативным последствиям (появление трещин) и некачественные строительные материалы. Уже отмечено несколько случаев как у нас в стране, так и за рубежом проседания фундаментов высотных зданий, смещение центра тяжести относительно геометрической оси.

Для того чтобы на ранних стадиях зафиксировать это, предпринять меры и уменьшить вероятность разрушения зданий необходимо создать прибор, фиксирующий малейшие изменения в конструкции здания. Этот прибор должен отвечать высоким требованиям надежности, точности и простоте.

**Постановка задачи.**

Для системы контроля состояния бетона необходимо определиться с наиболее удобным методом, с помощью которого возможно выполнить дефектоскопию бетонных конструкций.

**Ультразвуковой амплитудный теневой метод.**

Амплитудный теневой метод является первым применением ультразвуковых колебаний для выявления макроструктурных дефектов в заготовках и изделиях [1]. Чувствительность этого метода определяется влиянием дефекта на ослабление ультразвуковых колебаний в процессе их прохождения через акустический тракт дефектоскопа, т.е. от излучающего искателя 1 до приемного 2 (рис.1). Л.М. Яблоником получил зависимость изменения среднего акустического давления, вызываемого дефектом при:

$$Kab/Z_1 \leq 0.8 \text{ и } Ka^2 \leq 0.8 \tag{1}$$

где: a — радиус излучателя, b — радиус дефекта, K —  $2\pi/\lambda$  — волновое число.

Вызываемое дефектом относительное изменение величины сигнала:

$$\xi_P = \frac{\overline{P}_D}{P_0} = 1 - \frac{0.5Kb^2}{Z_1 Z_2} \tag{2}$$

где  $\overline{P}_D$  — среднее акустическое давление на приемном искателе при наличии дефекта,  $\overline{P}_0$  — среднее акустическое давление на приемном искателе при отсутствии дефекта. Выражение (2) упрощается:

$$\xi_P = 1 - \frac{2Kb^2}{Z} \tag{3}$$

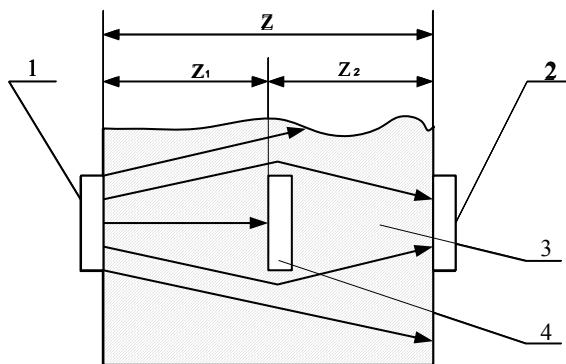


Рисунок 1 — Прохождение У.З. волн сквозь бетон: 1 — излучатель У.З. колебаний; 2 — приемник У.З. колебаний; 3 — упругая среда; 4 — дефект в упругой среде

Одно из первых уравнений, позволяющих оценить предельную чувствительность амплитудного теневого метода дефектоскопии, принадлежит Д.С. Шрайберу. Для случая наихудшей выявляемости, т. е. если дефект расположен симметрично относительно искателей:

$$(Z_1 = Z_2 = Z/2), b_{\min} = 0.55\sqrt{Z\lambda} \tag{4}$$

Преобразование уравнения (4) в соответствии с принятой на АРД-диаграмме системой координат приводит к выражению

$$\frac{b}{a} = 0.55\sqrt{\frac{Z}{Z_a}} \tag{5}$$

Таблица 1 — Примерные значения предельной толщины монолитного бетона, прозвучиваемого серийной аппаратурой, в зависимости от частоты используемых ультразвуковых колебаний

Частота колебаний, кГц	25	60	100	150
Предельная толщина бетона, м	2—6	0,75—3	0,5—1	0,3—0,5

**Ультразвуковой временной теневой метод.**

При временном теневом методе дефект характеризуется увеличением времени распространения ультразвуковых колебаний:

$$\xi_t = \frac{t_D}{t_0} \tag{6}$$

где  $\xi_t$  — относительное изменение времени распространения колебаний вызванное дефектом;

$t_0$  — время распространения колебаний в бездефектной зоне;

$t_D$  — время распространения колебаний в при наличии дефекта;

С известным приближением (без учета изменения спектрального состава сигнала при огибании дефекта, т. е. принимая, что скорость прохождения переднего фронта колебаний соответствует фазовой скорости на частоте искателей) чувствительность временного теневого метода может быть оценена исходя из представлений лучевой акустики (рис. 2)

$$b = \frac{Z}{2\xi_t} \sqrt{(\xi_t^2 - 1)(\xi_t^2 - n^2)} \quad n = \frac{|Z_2 - Z_1|}{Z} \tag{7}$$

где  $b$  — расстояние между краем дефекта и осевой линией искателя (рис.2);

$n$  — коэффициент, характеризующий положение дефекта по толщине изделия.

Согласно формуле (7) были проведены вычисления чувствительности зависящие от положения дефекта, которые показали, что чувствительность временного теневого метода минимальна при положении дефекта посередине между искателями. При наихудшей выявляемости ( $Z_1=Z_2$ ) выражение (7) принимает вид [1]:

$$b = \frac{Z}{2} \sqrt{\xi_t^2 - 1} \tag{8}$$

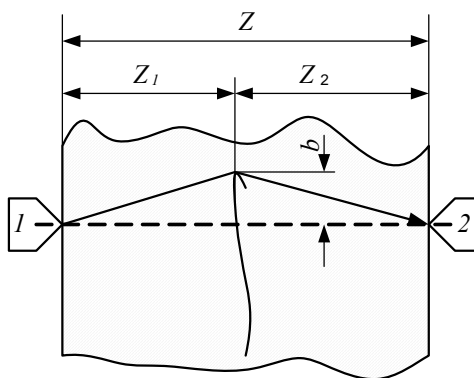


Рисунок 2 — Запаздывание УЗ. волны при дефектоскопии временным теневым методом

Выражения (7), (8) справедливы для точечных УЗ. преобразователей. Если площади соприкосновения преобразователей значительны, то выявляемый дефект при прочих равных условиях увеличивается на величину радиуса искателя  $a$ .

$$b = \left(a + \frac{Z}{2}\right) \sqrt{\xi_t^2 - 1} \tag{9}$$

В случае, если трещина выходит на поверхность, а глубина ее распространения  $h$ , то при установке излучающего и приемного искателей на одной плоскости рис. 3 также применяется уравнение (8) [1].

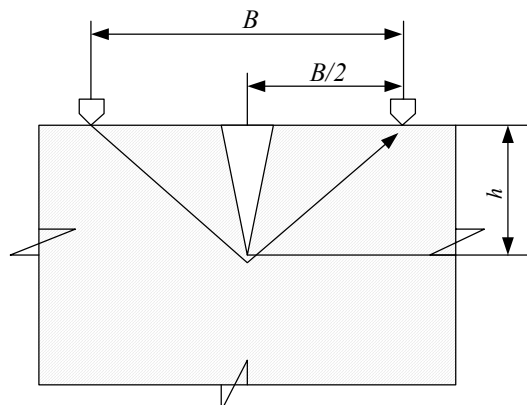


Рисунок 3 — Дефект, выходящий на поверхность

**Ультразвуковой эхо метод.**

Широкое распространение эхо-метода дефектоскопии при контроле изделий из мелкоструктурных материалов, и в частности металла, обеспечило и наиболее полное его теоретическое и экспериментальное исследование. Соотношение акустических давлений излученного сигнала  $P_0$ , эхо-сигнала  $P_d$  и радиуса дискового дефекта  $b$ , расположенного в дальней зоне излучающего и приемного искателей равного радиуса  $a$ , определяется уравнением.

$$\frac{P_d}{P_0} = R \left( \frac{a^2 b^2 \pi^2 f^2}{C^2 Z_1^2} \right) e^{-2\delta Z_1} \tag{10}$$

где  $R$  — коэффициент отражения ультразвуковых колебаний от дефекта.

Уравнение (10) хорошо согласуется с экспериментальными данными, если  $Ka^2/Z_1 \leq 2$  и  $Kb^2/Z_1 \leq 2$ . На рис 4. показана АРД диаграмма для эхо метода без учета затуханий ультразвуковых колебаний, что придает ей дополнительную универсальность и позволяет использовать при оценке дефекта. Полученное АРД диаграммой значение необходимо пересчитать с учетом затухания ультразвуковых колебаний в материале.

С увеличением частоты ультразвуковых колебаний улучшаются условия их отражения от дефекта и сужаются характеристики направленности искателя, но при этом резко возрастает коэффициент затухания колебаний  $\delta$ . На рис 4 приведена АРД диаграмма эхо метода.

Максимальная глубина контролируемой зоны изделия при дефектоскопии эхо-методом определяется наибольшим расстоянием до дефекта заданного размера, при котором он еще четко выявляется. Учитывая, что для регистрации без статистической обработки информации эхо-сигнал от дефекта должен как минимум вдвое превышать уровень реверберационных шумов получаем:

$$Z_{max} = \frac{\pi^2 b^2 a f^2}{C^2} \sqrt{\frac{2}{C \tau \delta_p}} \tag{11}$$

К недостаткам метода следует отнести то, что сигнал от дефекта, расположенного ближе к искателю, приходит первым и мешает выявлению более отдаленного сигнала.

**Метод ультразвуковой спектрометрии.**

Анализ спектра сигнала в ряде случаев позволяет уточнить тип дефекта, его ориентацию, форму и характер. Так, если зона повышенной пористости материала, вызывая ослабление сигнала, примерно одинаково снижает интенсивность всех его спектральных

составляющих, то при наличии макродефекта в первую очередь резко ослабляются высокочастотные составляющие сигнала. Влияние формы дефекта, расположенного в дальней зоне искателя ( $Z_1 \geq 3a^2\lambda$ ) на спектральную характеристику эхо-сигнала можно проследить по выражениям, оценивающим его относительную величину.

При низкочастотной ультразвуковой дефектоскопии фиксируемый сигнал является результатом интерференции колебаний, отраженных от боковых поверхностей изделия и прошедших различными путями. Свободна от интерференционных явлений лишь начальная часть сигнала, сформированная колебаниями, которые прошли кратчайшим путем. Количество периодов этой части сигнала определяется формой изделия, его размерами и частотой ультразвуковых колебаний. Естественно, что наибольшую информацию о дефекте несет именно эта часть сигнала, т. к. она определяется колебаниями, отраженными от дефекта. При ультразвуковой дефектоскопии, основанной на анализе частотного спектра сигнала, искатели должны иметь полосу пропускания, превышающую частоту  $f_{гр}$ , начиная с которой наблюдается существенное различие затухания колебаний в бездефектной зоне изделия и в зоне дефекта.

Сложность излучения ультразвукового сигнала с широким частотным спектром и трудности, возникающие при его анализе, привели к появлению двухчастотных систем. Этот путь основан на следующей предпосылке: для целей спектроскопии и, в частности, дефектоскопии нет необходимости оценивать изменение всего спектра сигнала, прошедшего через контролируемое изделие. Достаточно сопоставить относительное изменение амплитуд колебаний двух разнесенных друг от друга частот. При разработке аппаратуры производственного назначения этот метод является наиболее перспективным. Реализовать двухчастотный метод можно как при последовательном, так и при одновременном излучении колебаний двух частот.

#### **Метод синтезируемой апертуры, фокусируемой в точку (САФТ).**

Существенного улучшения пространственной разрешающей способности и доведения размеров разрешаемого объема до величины порядка  $\lambda$  зондирующего сигнала (как по фронту, так и по глубине) можно ожидать при использовании фокусировки у.з. излучения в выбранную точку пространства, которая в условиях соизмеримости глубин контроля и размеров у.з. преобразователей с  $\lambda$  практически осуществима лишь с помощью синтезированной апертуры достаточно больших волновых размеров. Этот метод синтезированной апертуры, фокусируемой в точку (САФТ), получает в последнее время все большее распространение в дефектоскопии мелкоструктурных материалов и медицинской диагностике, где применяется с целью улучшения разрешающей способности аппаратуры и повышения качества изображений. Сущность метода заключается в облучении выбранной точки исследуемого пространства с разных направлений с поверхности контроля, приеме эхо-сигналов от этой точки также с разных направлений и суммировании принятых сигналов с предварительным введением в них временных задержек, компенсирующих различия в расстояниях (временах прохождения сигнала) от точек поверхности контроля до выбранной точки исследуемого полупространства. Для получения двумерного изображения сечения контролируемого объема (томограммы) описанная процедура повторяется для всех точек выбранного сечения независимо от его ориентации относительно доступной поверхности.

Для пространственного накопления сигнала с целью увеличения отношения сигнал-шум, естественно, требуется возможно большее число некоррелированных реализации принятых колебаний, тогда как для осуществления лишь пространственной селекции (при отсутствии помех) синтезируемая апертура может быть разреженной.

#### **Методы, основанные на корреляционном анализе акустического сигнала.**

Взаимно-корреляционная функция между двумя широкополосными сигналами  $x(t)$  и  $y(t-\tau)$ , излученными одним искателем и имеющими одинаковые верхнюю  $w_в$  и нижнюю  $w_н$  граничные частоты, описывается выражением (12)

$$B_{x,y}(\tau) = I(\omega) v_{\Pi}^2 e^{-[\delta_x(\omega)Z_x + \delta_y(\omega)Z_y]} \frac{\sin(\Delta\omega\tau/2)}{\Delta\omega\tau/2} \cos(\omega_0\tau) \quad (12)$$

где  $Z_x, Z_y$  — расстояния, пройденные сигналами;  
 $I(\omega)$  — спектральная интенсивность излученного сигнала;  
 $v_{\Pi}$  — чувствительность приемных искателей;  
 $\delta_x(\omega)$  и  $\delta_y(\omega)$  спектральные коэффициенты затухания колебаний в средах;

$$\Delta\omega = \omega_B - \omega_H \quad \text{и} \quad \omega_0 = (\omega_B + \omega_H)/2.$$

Как следует из уравнения (29) корреляционная функция  $B_{x,y}(\tau)$  при постоянных характеристиках излучаемого сигнала  $I(\omega)$ ,  $\omega_B$ ,  $\omega_H$  и приемного тракта  $v_{\Pi}$  определяется спектральными коэффициентами затухания колебаний в средах и временем их распространения. В частном случае, если сигналы монохроматические

$$x(t) = X \sin(\omega t); \quad y(t-\tau) = X \sin[\omega(t-\tau)]$$

и излучающие и приемные искатели представляют собой резонансные элементы, настроенные на одинаковую частоту, корреляционная функция определяется выражением:

$$B_{x,y}(\tau) = (3 v_{\Pi} XY/2) \cos(\omega\tau) \quad (13)$$

Изменение корреляционной функции по мере увеличения временного сдвига между сигналами представляет собой затухающую по экспоненте синусоиду с периодом  $T_0 = 2\pi/\omega_0$  и огибающей  $e^{-\tau\Delta\omega/\pi}$ .

При корреляционном методе дефектоскопии для характеристики прозвучиваемой среды наряду с корреляционной функцией  $B_{x,y}(\tau)$  могут также использоваться ее отдельные параметры: период корреляционной функции  $T_0$ , изменение кривой корреляционной функции, смещение ее максимума по оси абсцисс и др. Оценка степени неоднородности среды по коэффициенту корреляции, определяемому отношением значений корреляционных функций, зафиксированных в разных зонах изделия

$$R(\tau) = \frac{B'_{x,y}(\tau)}{B''_{x,y}(\tau)} \quad (14)$$

Для однородного изделия  $R(\tau) = 1$ . В том случае, когда в одной из проконтролируемых зон имеется неоднородность,  $R(\tau) < 1$ . При использовании коэффициента корреляции для оценки однородности изделия отпадает необходимость учета интенсивности и спектрального состава излучаемых колебаний.

### **Разработка акустического метода контроля для выявления дефектов в бетонных конструкциях.**

Для решения вопроса нахождения несплошностей в бетонных сооружениях был разработан метод, основанный на прохождении акустических колебаний сквозь конструкцию и преобразовании своего спектра и амплитуды, задержки дает характеристику внутренним свойствам бетонных конструкций и может служить оценкой для анализа и выявления прогрессирующего размера дефектов. С помощью этого метода можно также приближенно оценить геометрические размеры дефекта и выявить положение размещения дефекта в направлении от излучателя.

Известен акустический метод свободных колебаний диагностики железобетонных опор контактной сети [5]. Метод основан на ударном тестовом воздействии на опору с последующим анализом колебаний в сравнении с эталонной опоры без дефекта. Для регистрации дефектных опор применяется ударный излучатель акустических колебаний в виде молотка и пьезоэлектрический преобразователь. О состоянии опоры судят по отклику акустического колебания. У нормальных опор частота колебаний выше, чем у опор с трещинами, отклик носит характер затухающих колебаний, а у дефектных наблюдается биения, повторные возрастания амплитуды колебаний.

Наиболее близким аналогом способа, является способ контроля физико-механических свойств материала. Устройство, реализующее способ, содержит генератор

звуковых сигналов, излучающего ультразвукового преобразователя и приемных ультразвуковых преобразователей, которые расположены на поверхности исследуемого образца. Сигнал с генератора подается на излучающий ультразвуковой преобразователь, возбуждающий ультразвуковые поверхностную и объемную волны, которые распространяются вдоль образца и принимаются преобразователями. Сигналы с приемных ультразвуковых преобразователей подаются на осциллограф. По определенной разности времени между сигналами, полученными от первого и второго приемного преобразователя, судят о физико-механических свойствах материала [6]. Контроль наличия нарушений целостности в бетоне, на основе известного способа возможен на малых расстояниях между излучателем и приемником. Это связано с большим коэффициентом поглощения ультразвука в бетоне и отсутствием мощных ультразвуковых излучателей. К тому же при контроле бетонных конструкций типа стена для регистрации трещин необходимо вводить ультразвуковые волны с торца стены, что обычно невозможно без разрушения конструкции.

В основу способа поставлена задача выявления нарушений целостности бетонных конструкций при эксплуатации. Акустический тракт проходит на низкочастотных ультразвуковых и звуковых частотах. За счет этого уменьшается коэффициент поглощения звука в бетоне. Излучение колебаний проводится ударным способом, что удобно для создания мощных звуковых колебаний и проведения контроля целостности больших участков конструкции. Поставленная задача решается тем, что излучение звуковых и ультразвуковых колебаний происходит ударным способом, при ударе в бетонной конструкции порождаются звуковые колебания, которые регистрируются звуковым приемником перед местом контроля и после него в направлении движения звуковых волн от излучателя к приемнику.

#### **Выводы**

Бетонная конструкция является композиционным материалам, в его состав входят различные наполнители: щебень, песок, пустоты, арматура и др. Это значительно усложняет дефектоскопию в бетонных конструкциях, вносит в сигнал помеху. Для выявления несплошностей в бетоне возможно применение лишь комплексного метода, который основан на прозвучивании бетонной конструкции сигналом широкого спектра, приеме этого сигнала и нахождении спектрального коэффициента затухания либо отражения.

#### **Литература**

1. Рапопорт Ю.М. Ультразвуковая дефектоскопия строительный деталей и конструкций. — Л.: Стройиздат, 1975. — 128 с.
2. Яблоник Л.М. «Заводская лаборатория». — 1963. — №1. — С. 46–48.
3. Круглов Б.А. Неразрушающий контроль качества в машиностроении. Материалы к семинару. Под ред. Кукли А.С., Николаева А.С. — Л., Изд ЛДНТП, 1967. — С. 33–56.
4. Ермолов И.Н. «Заводская лаборатория». — 1969. — №6. — С. 703–707.
5. Шрайбер Д.С. Ультразвуковая дефектоскопия. — М., «Металлургия», 1965.
6. Куликов В.А., Санников Д.В., Вавилов В.П. Применение акустического метода свободных колебаний для диагностики железобетонных опор контактной сети. — Дефектоскопия, 1998. — №7. — С. 40–49.
7. Описание изобретения к авторскому свидетельству СССР. (19)SU<sub>(11)</sub> 1518779 A1 (51) 4 G 01 N 29/00. Способ контроля физико-механических свойств материала.

Здано в редакцію:  
24.03.2009р.

Рекомендовано до друку:  
д.т.н, проф. Чичикало Н.І.